

Quel temps fait-il au-dessus de la calotte antarctique ?

Marie-Laure Roussel*

* e-mail: mlroussel@orange.fr

Introduction

Avec une superficie de 14 millions de kilomètres carrés recouverts à 98% de glace, l'Antarctique est le plus grand réservoir continental d'eau sur Terre. Ce continent recouvert de glace est très sensible à toute modification du climat. Bien qu'il soit isolé, sa dynamique a une influence globale, c'est pourquoi il est l'objet d'un grand intérêt dans les études climatiques. Pour quantifier l'état d'un glacier, un calcul de la somme des pertes et gains de glace de celui-ci est réalisé : c'est le bilan de masse (illustré par la figure 1). Il est principalement alimenté par les précipitations sur la calotte et amoindri par divers processus physiques tels que l'évaporation et l'écoulement de la glace vers l'océan. Ainsi, l'augmentation des précipitations sur la calotte antarctique envisagée par le GIEC pour la fin du XXI^e siècle (Stocker et al., 2013¹⁰) aurait pour conséquence un surplus d'accumulation sur le continent (Gregory & Huybrecht, 2006⁴) qui se répercuterait sur le niveau moyen des océans. La compréhension des mécanismes liés aux précipitations dans la région antarctique et globalement est donc essentielle pour l'étude du climat. Pour cela - et comme pour tous les phénomènes atmosphériques - il est nécessaire d'avoir recours aux observations et aux mesures météorologiques ainsi qu'à l'utilisation de modèles de prévision du temps et de climat. S'il est traditionnel d'étudier les précipitations en surface - par le biais d'un cumul dont la quantité est exprimée en mm - cette approche ne permet pas de rendre compte de certains processus physiques comme l'évaporation - qui ont lieu en altitude et qui impactent les résultats au sol. Cette vision de toute la colonne atmosphérique a donc été choisie dans ce travail.

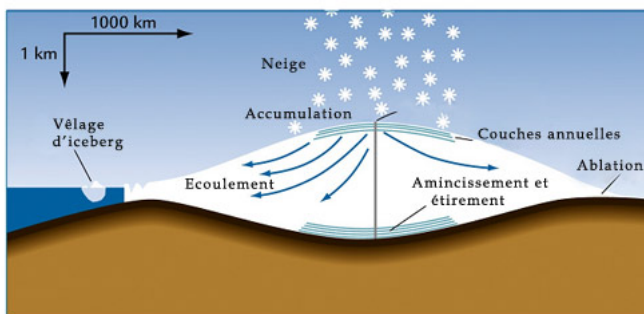


FIGURE 1. Processus du bilan de masse antarctique -
Source : William F.Ruddiman

Les conditions climatiques en Antarctique

Le continent antarctique est majoritairement très froid et sec avec des vents souvent plus forts que ceux des tempêtes des moyennes latitudes, mais des disparités importantes sont à noter entre ses différentes régions. Les conditions météo-

COMMENT SE FORMENT LES PRÉCIPITATIONS ?

Les précipitations (sous forme de pluie ou de neige autrement appelées *hydrométéores*) sont le résultat de deux principaux processus :

1. la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère - c'est-à-dire le changement d'état de l'eau de vapeur à liquide ou solide - formant les nuages
⇒ elle intervient lorsqu'il y a - au moins - *saturation*, lorsque l'atmosphère contient le maximum de vapeur d'eau possible pour une température et une pression données
2. la croissance des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace des nuages jusqu'à ce qu'ils soient trop lourds pour rester en suspension dans l'atmosphère - provoquant leur chute
⇒ elle se réalise par de multiples processus qui ont lieu simultanément : collision (choc entre deux hydrométéores), coalescence (fusion de deux hydrométéores) etc.

Ces deux phénomènes peuvent se réaliser de diverses façons en fonction des conditions du milieu.

⚠ **Peu de nuages donnent lieu à des précipitations**

⚠ **Les précipitations formées en altitude n'atteignent pas toutes le sol**

rologiques sont principalement influencées par l'altitude et la proximité de l'océan (qui gèle pendant l'hiver austral). Les précipitations sont majoritairement de type stratiforme, c'est-à-dire issues de nuages en couches horizontales formés dans des systèmes météorologiques de large échelle, où l'air est stable. A l'intérieur du continent, sur le plateau où l'altitude dépasse 2250 mètres et les perturbations entrent rarement, les températures et les quantités de précipitations* annuelles sont très faibles (bien qu'elles soient fréquentes!). Par exemple à Vostok, on relève -54°C et 14mm par an. A l'opposé sur les côtes - dont l'altitude est proche du niveau de la mer - le passage régulier de perturbations et l'océan réchauffent et humidifient l'atmosphère. Au niveau de la péninsule, les précipitations sont dominées par les ascendances orographiques (avec un effet de Foehn en aval). Une climatologie du continent complet est présentée sur la figure 2.

* il est important de noter que les précipitations en Antarctique sont essentiellement sous forme solide. Un hydrométéore est particulier de ce continent : le poudrin de glace, composé de très petits cristaux de glace formés par congélation

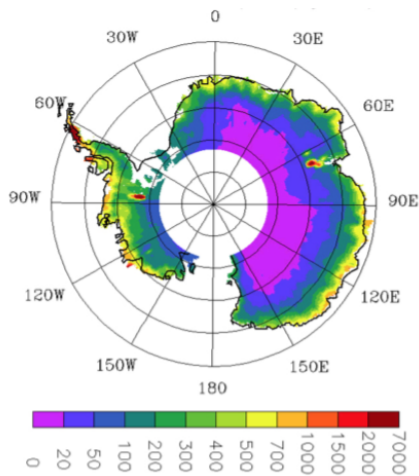


FIGURE 2. Précipitations annuelles en Antarctique mesurées par le satellite CloudSat – Source : *Palerme et al., 2014*⁸

de la vapeur d'eau lors d'une chute de la température, qui tombent très lentement donnant l'impression d'être en suspension dans l'air.

Les mesures météorologiques en Antarctique

Les conditions météorologiques en Antarctique sont peu favorables à la présence humaine et à l'instrumentation. Néanmoins, les bases de recherches scientifiques maintenues tout au long de l'année permettent de réaliser des mesures et observations météorologiques *in-situ* standards. En complément, les technologies plus récentes de météorologie reposant sur la télédétection sont d'une importance capitale : balayant à la fois l'espace sur la verticale et sur l'horizontale, elles fournissent une quantité précieuse d'informations sur l'atmosphère.

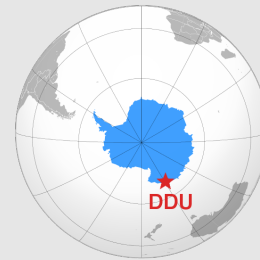
Les mesures *in-situ*

Les moyens de mesure à DDU : station météo, ballons-sondes et Pluvio2

La station météorologique de DDU est opérée par Météo-France. Des capteurs similaires à ceux utilisés dans le réseau français métropolitain permettent de réaliser de façon horaire des mesures de température, humidité, vent (direction et force) et pression. Des programmes de recherche viennent compléter ces activités de météorologie, notamment APRESS*.

Un lancer de ballon-sonde - dispositif météorologique accroché à un ballon s'élevant dans l'atmosphère et pouvant atteindre 25 kilomètres d'altitude - est réalisé chaque jour de façon opérationnelle par Météo-France. Ces mesures sur la verticale permettent de compléter les données recueillies en surface.

LA BASE DUMONT D'URVILLE



La base de recherche scientifique de Dumont d'Urville (DDU) a été l'objet d'une attention particulière dans ce travail. Ses coordonnées géographiques sont 66°S 140°E : elle se situe à environ 5 kilomètres de la côte de la Terre Adélie, où la météo y est moins extrême que sur le continent, en faisant un point privilégié pour l'observation et caractéristique de la côte Est antarctique. Les températures y tombent rarement sous -30°C et les maxima peuvent dépasser 0°C mais le vent (majoritairement de type *catabatique**) y est très violent (environ 180-200km/h).

* le vent *catabatique* provient de l'intérieur du continent : il est dû à la fine couche d'air froid sur le plateau s'écoulant vers les côtes le long de la pente jusqu'à l'océan et dévié sous l'effet de la force de Coriolis. L'air sec qu'il transporte influence de façon non négligeable les précipitations - en les évaporant - dans les basses couches de l'atmosphère (Grazioli et al., 2017³).

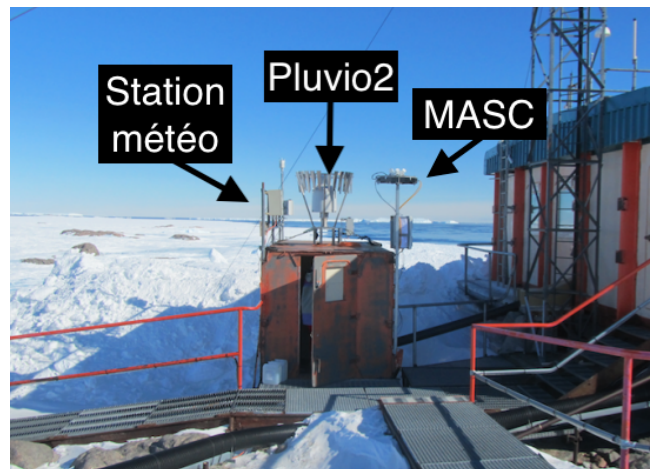


FIGURE 3. Instruments de mesure à DDU – Source : *aasnow.wordpress.com*

L'instrument utilisé pour mesurer la quantité de précipitations atteignant la surface à DDU est le pluviomètre Pluvio2 présenté sur la figure 3, installé dans le cadre du

programme APRES3. Il mesure la masse de neige tombée dans un récipient placé sur une balance détectant les changements de masse avec précision.

⇒ Ce système - malgré sa collerette de protection - possède une limite : il ne fait pas la différence entre les précipitations tombant du ciel et celles provenant de la surface, soulevées par le vent. Aussi, les turbulences peuvent être à l'origine d'une augmentation de masse dans le récipient, à cause des vibrations du capteur - très sensible - qu'elles entraînent.

D'autres instruments - tels que le MASC, le LIDAR et le disdromètre - dont les données ne sont pas exploitées dans cette étude sont présents à DDU et sont présentés par C. Durán-Alarcón sur le site web aasnou.wordpress.com.

* le programme APRES3 - pour *Antarctic Precipitation, Remote Sensing from Surface and Space* - a été engagé avec le support de l'ANR et l'IPEV et réalisé par une collaboration de chercheurs français et suisses entre 2015 et 2019. Son objectif principal a été de caractériser les précipitations sur toute la calotte et en particulier à DDU.

Les observations humaines à DDU

Les relevés automatiques réalisés à la station de DDU sont complétés par la présence humaine assurée de façon opérationnelle par Météo-France. Un résumé des paramètres météorologiques mesurés est donné dans un TCM - relevé mensuel de la météo à la station - accompagné d'une information issue de l'observation humaine visuelle permettant de compléter certaines données (ex. : chronologie des phénomènes, type de nuage etc.). Celle-ci est essentielle mais subjective et peut être erronée - en particulier dans les conditions polaires.

Les mesures par télédétection

Le MRR à DDU



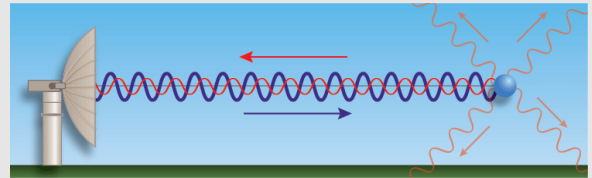
FIGURE 4. MRR à DDU et son radome – Sources : aasnou.wordpress.com / metek.de

Le MRR est un RADAR de surface situé à DDU pouvant mesurer les précipitations de 300 à 3000 mètres d'altitude, installé dans le cadre de la campagne APRES3. Du fait de la nature des précipitations en Antarctique, cette mesure peut être représentative d'un domaine s'étendant sur plusieurs kilomètres autour de la base. Ce RADAR n'était pas fait à l'origine pour

mesurer un taux de chute de neige. Néanmoins, à l'aide d'un second RADAR et après une étude (Grazioli et al., 2017²) un logiciel de retraitement a été mis en place pour convertir de façon fiable les mesures réalisées. L'ensemble de la procédure est détaillée par Durán-Alarcón et al., 2019¹.

COMMENT MESURER LES PRÉCIPITATIONS AVEC UN RADAR MÉTÉOROLOGIQUE ?

Le fonctionnement d'un RADAR repose sur l'utilisation des ondes électromagnétiques et de leur interaction avec le milieu - modifiant les propriétés de celles-ci.



Principe : l'antenne du RADAR envoie un faisceau d'ondes qui se propagent et sont réfléchies par un objet (ici : les hydrométéores). Un signal retour est reçu par l'antenne et enregistré puis traité par un système électronique.

L'exploitation du temps de parcours des ondes depuis la source (l'antenne RADAR) jusqu'à l'objet permet d'obtenir la distance et la vitesse relative de ce dernier (par rapport à la source). La méthode est basée sur l'effet Doppler : celui-ci repose sur la modification de la fréquence des ondes par le mouvement relatif de l'objet par rapport à la source. La variation de fréquence peut être calculée et reliée à la vitesse de cet objet.

La puissance du faisceau émit par l'antenne est en partie atténuée par l'objet lors de la réflexion. La puissance rétro-diffusée - c'est-à-dire la puissance du faisceau réfléchi qui retourne vers l'antenne - est utilisée pour déduire des propriétés particulières de l'objet (ici : la taille des hydrométéores). La réflectivité RADAR - ou l'efficacité avec laquelle la puissance est renvoyée par l'objet - est ensuite reliée au taux de chute des hydrométéores.

Le CPR du satellite CloudSat

L'instrument embarqué sur la plate-forme satellite CloudSat est un RADAR à visée au nadir - observant à la verticale vers le bas. Cette mesure peut être réalisée jusqu'à 82° de latitude. A partir d'hypothèses sur les hydrométéores (taille, forme etc. réalisées par Wood, 2011¹¹, Wood et al., 2015¹³) la réflectivité permet de retrouver le taux de chute de neige.

Malheureusement de nombreuses sources d'erreur sont reliées à cette mesure : les hypothèses réalisées ainsi que la fréquence de passage du satellite sur l'Antarctique induisent

des résultats incertains qui ont fait l'objet d'une étude (Palerme et al., 2019⁷). L'effet des échos parasites du sol affectant la mesure a aussi été soulevé par Palerme et al., 2019⁷. Enfin, le satellite - opérationnel depuis 2006 - rencontre un problème technique qui l'empêche de réaliser des mesures de nuit depuis 2011.

Néanmoins, les données issues du RADAR ont été exploitées et font l'objet de la première climatologie antarctique en 3D réalisée par Lemonnier et al., 2019⁵ avec une résolution optimale permettant d'assurer un bon accord avec les observations de surface (Souverijns et al., 2018⁹, Palerme, 2014⁶) et une meilleure confiance dans ces résultats (Lemonnier et al., 2019⁵).

Les prévisions en Antarctique : l'efficacité comparée des modèles

Les modèles de prévision du temps et de climat

Différents modèles de circulation générale atmosphérique existent et peuvent être utilisés pour la prévision du temps ou du climat terrestre. Ces derniers reposent sur les équations de la physique, de la dynamique et thermodynamique des fluides ainsi que des paramétrisations de phénomènes à petite échelle. On distingue :

- les modèles globaux tels que ARPEGE (Météo-France/CNRM), IFS (ECMWF), LMDZ (LMD/IPSL) qui ont l'avantage de décrire l'ensemble du globe au détriment des processus plus fins
- les modèles régionaux tels que AROME (Météo-France/CNRM) ou MAR (IGE/Université de Liège), qui ont l'avantage de décrire leur zone de façon raffinée mais qui doivent être forcés - c'est-à-dire guidés sur les bords - par des *réanalyses**

Des configurations particulières peuvent être utilisées pour ces modèles. Par exemple, les modèles ARPEGE et LMDZ peuvent être utilisés pour la prévision du temps avec une résolution plus fine localement - on parle de *zoom* - ou pour les projections climatiques.

* une *réanalyse* est une correction à posteriori combinant les données d'un modèle et les observations - afin de réduire les erreurs et de s'approcher au mieux de la réalité. ERA5/ERA-Interim (ECMWF) est une base de données de réanalyses issue du modèle IFS.

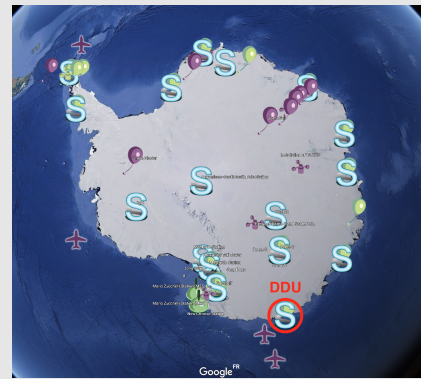
Une comparaison qualitative à l'échelle synoptique des résultats de modèles

La campagne YOPP - pour *Year Of Polar Prediction* - a été l'occasion précieuse permettant d'acquérir de nombreuses données d'observations - en particulier à DDU - pour l'évaluation des modèles sur l'Antarctique à une échelle réduite. L'intérêt est porté sur quatre modèles : ARPEGE (zoom sur le Dome-C, à environ 1000 kilomètres de DDU), LMDZ (zoom sur DDU), IFS et MAR. La référence choisie pour l'évaluation

LA CAMPAGNE YOPP

La campagne YOPP (*Year of Polar Prediction*) s'est étendue entre 2017 et 2019. Elle fait partie du programme de recherche météorologique mondial WWRP initié par l'OMM. L'objectif a été d'augmenter et d'améliorer les moyens d'observation et de modélisation aux pôles afin de mieux comprendre les processus et interactions physiques au sein de ces régions et avec le reste de la Terre.

Pour cela une période d'observation a été engagée sur chacun des pôles, et en particulier sur certains *super sites* - localisés sur la figure ci-dessous - comme la base DDU, où de nombreuses activités ont été menées (ex. : lancers de ballons-sondes supplémentaires) entre novembre 2018 et février 2019.



des modèles est celle du MRR. Pour cela, les séries temporelles des quantités de précipitations journalières entre 300 et 3000 mètres d'altitude sont analysées et représentées sur la figure 5.

Il est intéressant d'étudier l'efficacité des modèles à prévoir les événements précipitants. Par exemple, la longue période sans précipitations - au premier tiers de la période observée - est bien prévue par les modèles. Aussi, un événement de précipitation présentant un phénomène particulièrement présent dans les régions polaires - l'évaporation des précipitations en basses couches (entouré en rouge sur la figure 5) est bien observé par les modèles. Néanmoins, les modèles semblent prévoir davantage d'événements précipitants, ainsi que des événements plus longs et plus intenses. Pour distinguer leurs comportements, la table 1 de diagnostic est utilisée. Chaque événement à chaque niveau d'altitude est étudié, en considérant le seuil de 0.28mm/jour (d'après Palerme et al., 2014⁸) pour distinguer la présence et l'absence de précipitation. A partir de ce diagnostic, les scores suivants sont calculés et illustrés - sur la figure 6 - sur toute la colonne atmosphérique pour chacun des modèles :

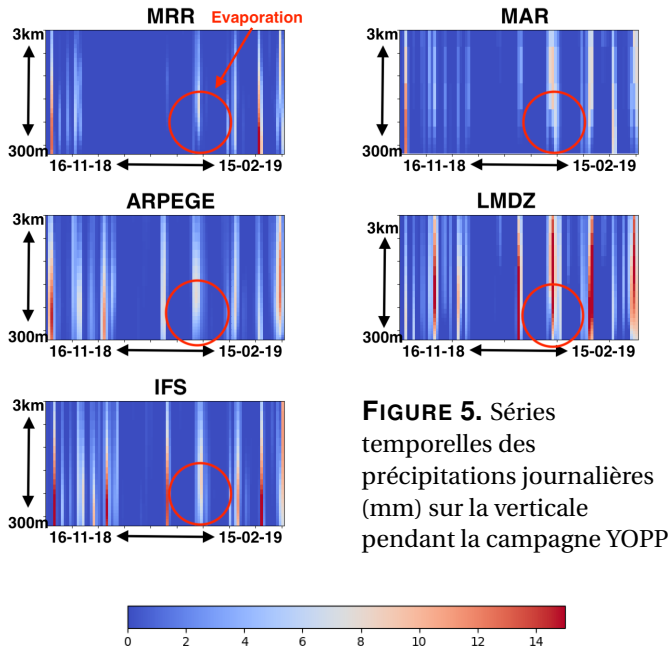


FIGURE 5. Séries temporelles des précipitations journalières (mm) sur la verticale pendant la campagne YOPP

- le biais (B) : c'est le ratio du nombre d'événements prévus sur le nombre d'événements observés. Cela indique si le modèle a tendance à sur-prévoir ($B > 1$) ou sous-prévoir ($B < 1$). Le score parfait est 1.
- la probabilité de détection (POD) : c'est le ratio de succès parmi les événements prévus. Le score parfait est 1.
- le ratio de fausses alertes (FAR) : c'est le ratio du nombre de prévisions qui ne se sont pas produites sur la totalité des événements prévus. Le score parfait est 0.

$$B = \frac{S + FA}{S + M} \quad POD = \frac{S}{S + M} \quad FAR = \frac{FA}{S + FA}$$

| | | Observation | |
|-----------|-----|-------------|--------------------|
| | | Oui | Non |
| Prévision | Oui | Succès (S) | Fausse alerte (FA) |
| | Non | Manqué (M) | Rejet correct (RC) |

TABLE 1. Table de diagnostic pour la comparaison des prévisions aux observations

| Scores | B | POD | FAR |
|--------|-----|------|-----|
| ARPEGE | 2.4 | 0.99 | 0.6 |
| IFS | 2 | 0.6 | 0.7 |
| MAR | 1.7 | 0.92 | 0.4 |
| LMDZ | 2 | 0.96 | 0.5 |

TABLE 2. Scores des modèles ARPEGE, IFS, MAR et LMDZ pendant la période YOPP sur la verticale

La table 2 permet de constater que les modèles sur-prévoient. Les modèles MAR, IFS et LMDZ présentent un biais global inférieur à celui du modèle ARPEGE. Ceci provient en partie du fait que le modèle ARPEGE a peu "manqué" des événements durant la période - contrairement au modèle IFS. Les probabilités de détection indiquent que les modèles ARPEGE et LMDZ comme le modèle MAR réussissent à détecter plus souvent les événements précipitants sur la verticale que le modèle IFS. Néanmoins, le modèle IFS simule de nombreuses fausses alertes. La série temporelle permet de constater que les mêmes événements de la catégorie fausse-alerte sont souvent créés par les modèles. Le modèle LMDZ est finalement celui qui se rapproche le plus du modèle MAR, dont les scores sont les meilleurs.

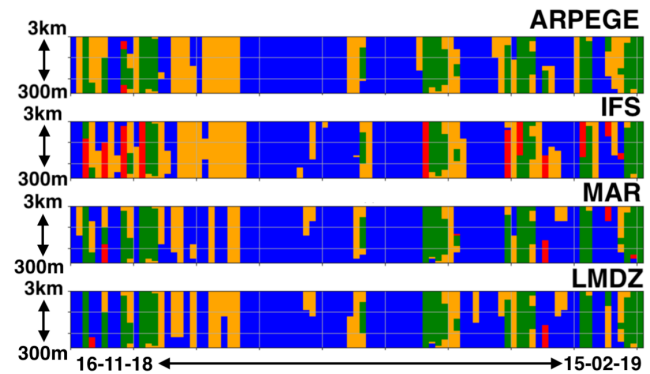


FIGURE 6. Séries temporelles des scores des modèles pendant la période YOPP

Conclusion & perspectives

A travers ce travail, une analyse des précipitations sous une nouvelle vision - tridimensionnelle - a pu être menée grâce aux résultats de la récente campagne YOPP. Quatre modèles ont pu être comparés au niveau de DDU, permettant de mettre en avant les comportements similaires de ces derniers sur une zone pouvant être caractéristiques de toute la côte Est Antarctique. Une exploitation des variables météorologiques prévues par ces différents modèles pourrait mettre en avant l'origine de ces erreurs.

D'autre part, l'étude de ces modèles en comparaison avec la climatologie CloudSat sur la période 2007-2010 permettrait d'analyser quantitativement leurs comportements sur une échelle temporelle plus longue.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à de nombreux soutiens : un grand merci à mes responsables Christophe Genthon et Jean-Louis Dufresne, mais aussi à Florentin Lemonnier, Claudio Durán-Alarcón et Cécile Agosta pour m'avoir fourni de nombreuses données, ainsi qu'à Gaëtan Heymes, Eric Bazile, Alexis Berne, Jerome Servonnat et Etienne Vignon, qui m'ont chacun

apporté une aide précieuse. Enfin, merci à l'ensemble du Laboratoire de Météorologie Dynamique pour leur accueil très sympathique.

Sigles

| | |
|---------------|--|
| ANR | Agence Nationale de la Recherche |
| AROME | Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle |
| ARPEGE | Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle |
| APRES3 | Antarctic Precipitation, Remote Sensing from Surface and Space |
| CNRM | Centre National de Recherche Météorologique |
| CPR | Cloud Profiling RADAR |
| DDU | Dumont D'Urville |
| ECMWF | European Center for Medium-range Weather Forecasts |
| GIEC | Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat |
| IGE | Intitut des Géosciences et de l'Environnement |
| IPEV | Institut Paul Emile Victor |
| IPSL | Institut Pierre Simon Laplace |
| LIDAR | Light Detection And Ranging |
| LMD | Laboratoire de Météorologie Dynamique |
| MAR | Modèle Atmosphérique Régional |
| MASC | Multi-Angle Snowflake Camera |
| MRR | Micro Rain RADAR |
| OMM | Organisation Météorologique Mondiale |
| RADAR | Radio Detection And Ranging |
| TCM | Tableaux Climatologiques Mensuels |
| WWRF | World Weather Research Program |
| YOPP | Year Of Polar Prediction |

Références

1. C. Durán-Alarcón, B. Boudevillain, C. Genthon, J. Grazioli, N. Souverijns, N. P. M. van Lipzig, I. V. Gorodetskaya, and A. Berne. The vertical structure of precipitation at two stations in east antarctica derived from micro rain radars. *The Cryosphere*, 13(1) :247–264, 2019.
2. J. Grazioli, C. Genthon, B. Boudevillain, C. Durán-Alarcón, M. Del Guasta, J.-B. Madeleine, and A. Berne. Measurements of precipitation in dumont d'urville, adélie land, east antarctica. *The Cryosphere*, 11(4) :1797–1811, 2017.
3. J. Grazioli, J.-B. Madeleine, H. Gallée, R. Forbes, C. Genthon, G. Krinner, and A. Berne. Katabatic winds diminish precipitation contribution to the antarctic ice mass balance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(41) :10858–10863, 2017.

4. J.-M. Gregory and P. Huybrechts. Ice-sheet contributions to future sea-level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* :364, 2006.
5. F. Lemonnier, J.-B. Madeleine, C. Claud, C. Genthon, C. Durán-Alarcón, C. Palerme, A. Berne, N. Souverijns, N. van Lipzig, I. V. Gorodetskaya, T. L'Ecuyer, and N. Wood. Evaluation of cloudsat snowfall rate profiles by a comparison with in situ micro-rain radar observations in east antarctica. *The Cryosphere*, 13(3) :943–954, 2019.
6. C. Palerme. *Study of Antarctic precipitation by radar remote sensing, in-situ measurements, and intercomparison of climate models*. Theses, Université de Grenoble, Nov. 2014.
7. C. Palerme, C. Claud, N. B. Wood, T. L'Ecuyer, and C. Genthon. How does ground clutter affect cloudsat snowfall retrievals over ice sheets? *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(3) :342–346, March 2019.
8. C. Palerme, J. E. Kay, C. Genthon, T. L'Ecuyer, N. B. Wood, and C. Claud. How much snow falls on the antarctic ice sheet? *The Cryosphere*, 8(4) :1577–1587, 2014.
9. N. Souverijns, A. Gossart, S. Lhermitte, I. V. Gorodetskaya, J. Grazioli, A. Berne, C. Duran-Alarcon, B. Boudevillain, C. Genthon, C. Scarchilli, and N. P. M. van Lipzig. Evaluation of the cloudsat surface snowfall product over antarctica using ground-based precipitation radars. *The Cryosphere*, 12(12) :3775–3789, 2018.
10. T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and M. P.M. *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
11. N. Wood. *Estimation of snow microphysical properties with application to millimeter-wavelength radar retrievals for snowfall rate*. PhD thesis, 2011.
12. N. Wood, T. L'Ecuyer, D. Vane, G. Stephens, and P. Partain. *Level 2C Snow Profile process description and interface control document*, 2013.
13. N. B. Wood, T. S. L'Ecuyer, A. J. Heymsfield, and G. L. Stephens. Microphysical constraints on millimeter-wavelength scattering properties of snow particles. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(4) :909–931, 2015.

